

PJA News Letter

No.12

<https://www.japan-acad.go.jp/pjab> 日本学士院

Proceedings of the Japan Academy,
Ser. B ニュースレター



目次

挨拶	1
インタビュー 永嶺謙忠氏	1
トピックス 糖鎖の謎	8
Vol. 95 掲載論文紹介	9
Proceedings of the Japan Academy, Ser. B について	12
Editorial Board	12

挨拶

Editor-in-Chief
大塚 正徳

PJA News Letter は、日本学士院が出版している英文誌 Proceedings of the Japan Academy, Ser.B (PJAB) についての情報を多くの人々に知って頂くため、毎年一回、広範囲に発送しています。

PJAB は一巻一号が 1912 年に出版されて以来今日まで、学術の発達を目指す日本学士院の活動を国外、国内に向けて発信して来ました。最近、出版委員会は PJAB を改善するため、すべての論文について英文校閲を行うこと、カラー印刷の費用を支援すること、Supplementary Information をネットに公開すること、などを決めました。また総説論文には、その分野に既に貢献している方に執筆いただくことを明確にしました。詳しくは Web で公開している Instructions to Authors をご覧ください。

素粒子ミュオンは電子と同じレプトンの仲間
で、1937 年に宇宙線の中から発見されました。
一時は湯川パイ中間子と混同され、ミュー中
間子と呼ばれたこともあります。そのミュオン
(ミュー粒子) の研究をリードしてきたのが永
嶺謙忠東京大学名誉教授・高エネルギー加速
器研究機構名誉教授です。

ミュオンの質量は電子の約 200 倍あり、エネ
ルギーを上げると厚い物質でも通り抜けるとい
う性質があります。それを活かして、1991 年、
永嶺博士は水平線すれすれに飛来する宇宙線
ミュオン (CRM) を検出器でとらえて画像化

インタビュー

永嶺謙忠

×

(聞き手)

高崎史彦

三宅康博

齊藤直人

山崎敏光

する「水平 CRM ラジオグラフィー」を世界で
初めて実現させました。これにより、火山の内
部構造や福島第一原発の内部も透視撮影でき
るようになりました。

一方で、永嶺博士らは、加速器による陽子
ビームを標的に当ててミュオンビームをつくり、
それを利用して核物理・物性にわたる各種の研
究を進めてきました。J-PARC で大強度のミュ
オンビームが整備される時代を迎え、ミュオン
はいま、究極の衝突型加速器やミュオン顕微鏡
など、電子に代わって次世代科学の主役に躍り
出ようとしています。

左より
山崎敏光、三宅康博、永嶺謙忠、齊藤直人、高崎史彦の各氏
日本学士院会館にて



原子炉内部を透視する 宇宙線ミュオン

山崎：今回の永嶺さんの日本学士院賞は宇宙線のラジオグラフィー（宇宙線による画像作成技術）に焦点が当てられていますが、永嶺さんのミュオン研究はもっと広い範囲にわたっています。今日はそうした広い話と、それらが将来にどうつながっていくかについて語っていただきたいと思います。

永嶺：私自身の研究年表を作ってみて、まさに「ミュオンと生きる」ということだったことがわかりました。宇宙線ミュオンのラジオグラフィーは、私より20年ぐらい前に、アルバレという人が真上から降ってくる宇宙線ミュオンを使ってピラミッドの中を観測する仕事をしています。私はそのことをあまり知らなかったのですが、雲仙普賢岳が噴火した1990年に、何か貢献できないかと考えていて、出張帰りの飛行機の中で、水平のミュオンに気づいたのです。地球は丸くて、周りの空気から宇宙線ミュオンがやってくるわけですが、そういう水平のミュオンを使えば、火山内部が見えるのではないかと考えたのです。アルバレがやったピラミッドの場合はあらかじめトンネルが用意されていたので放電箱（スパークチェンバー）が使える

ましたが、火山の中にトンネルを掘るわけにはいきません。

このアイデアを外国に行ってたびたび話しました。すると、「実現したらすごいぞ」と言われて、その気になったのです。結局、山体外部に置いた検出器群（多重プラスチックカウンタ）で水平ミュオンを捉え、強度減衰測定から山体内部を調べることができました。

その後、いろいろやっていくうちに、若い学生さんの中に大変優秀な人が出てきました。その1人が東大地震研の教授になっている田中宏幸さんです。火山の中を実際に調べるのは彼らにバトンタッチしました。浅間山、岩手山など10ぐらいの火山をやったと思います。途中で4カ国ぐらいの人たちがアメリカやヨーロッパでも始めました。

「ミュオンと生きる」

次に溶鉱炉を調べました。知り合いに新日鉄に勤めている人がおり、溶鉱炉というのは1000億円ぐらいするけど、数十年たつと自動的に解体することになっているというんです。新しくしないと耐火煉瓦がもたないからだと言われたので、それなら調べる方法があるだろうということで始めました。火山のスケールをちょっと小さく

した対象でした。結果は非常に簡単で、半日ぐらいの宇宙線で見えてくることを解明して、その後、いろいろと発展していきました。

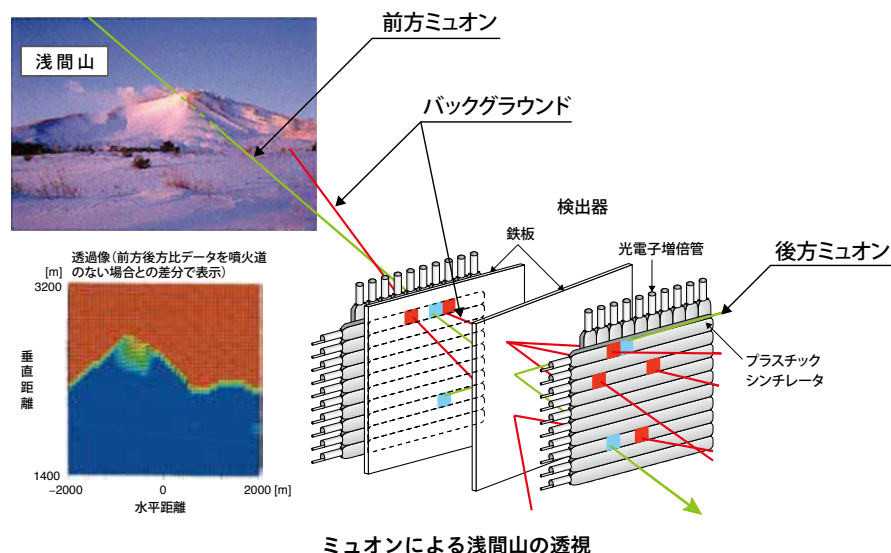
そして2011年、福島第一原子力発電所の大事故が起きました。それ以降、高崎史彦先生が中心になってグループを率いられ、福島第一原発の中がどうなっているかを探られているわけです。

要するに、私たちは真横から来るミュオンを利用するという方式をとったのですが、これは加速器実験でのミュオンテレスコープの原理であり、いつもやっていることをただ応用しただけなのです。それが、思いがけずいろいろな所に発展していきました。言葉が悪いですが、この方面の研究はいわば片手間にやった感じがあります。

私の本業は陽子加速器を使って大強度のミュオンビームをつくり、それを使ってさまざまな研究を進めることでした。

1972年ころ、山崎敏光先生の東大グループのメンバーとしてパークレーとバンクーバーに遠征し、そのDC（直流状）ミュオンビームを用いて偏極ミュオンの研究を展開した後、日本に帰ってきました。しかし当時の日本にはミュオン源がなかったので、どうしたらいいか思案していたときに、KEK（高エネルギー加速器研究機構）のパルスのブースター・シンクロトロンを使えば、非常によいパルス状ミュオンができることに気がついたのです。それを使って研究を進めました。

パルスのミュオンには利点がありました。ロスアラモス研究所などに比べると、1/100～1/1000ぐらいの強度しかないミュオンビームですが、時間的なパルス構造を持っていることをうまく使うと、いろいろなことがわかってきました。例えばその後、ノーベル賞をとったスティーブン・チューがレーザーを抱えてベル研究所からやってきました。そして、レーザーのパルスで励起すれば、ミュオンビームとうまく共鳴することを示しま



した。それがスタートで、ここにいる三宅康博さんらと一緒に超低速ミュオンという概念を発展させて今日に至っています。

三宅：最初にやった実験が懐かしいです。

永嶺：重要なことは、パルス状ミュオンだと、非常に極端な強度で実験ができることです。それを実証したのがレーザー共鳴や超低速ミュオン源です。

同時に、パルスで非常にいいことは、大きな白色雑音のバックグラウンドがあっても、ミュオンのイベントを同期して見ることができることです。ここから、強い制動放射雑音の存在下で、パルス状ミュオン触媒核融合のX線観測に成功しました。

永嶺：1989年に常温核融合騒ぎが起きました。このとき、ミュオン核融合というのがあると誰かが聞きつけて、常温核融合の化学者、熱核融合の研究者といっしょに自民党本部に呼ばれました。3人が講演したのですが、一番関心を持たれたようで、後半の質問は全て私に来ました。これがきっかけで予算が出て、それが理研-RAL（英ラザフォード・アップルトン研究所）支所につながりました。

というわけで、不思議な偶然と幸運が重なりまして、今日まで至ったわけです。超低速ミュオンが生まれ、それを多くの方々が素粒子研究に使う時代になってきたわけで、私としては光榮至極であると思っています。

J-PARCで展開される ミュオン研究

高崎：今の話を掘り下げると、J-PARC（茨城県東海村に所在する大強度陽子加速器施設。現在のセンター長は齊藤直人氏）ではその後、永嶺案のいずれかを展開してやっているのですか？

齊藤：ミュオンと名のつく課題は全て永嶺さんが取り上げられたもの、というのが僕の印象です（笑）。当然のことながら、J-PARCのビームラインと

しても、またそこでの実験にしても、かなり多くのことが永嶺先生の提案の上に作り上げられていると思います。

三宅：そうですね。理研-RALは、KEKのものよりも10倍から数10倍も強度が高かったんですが、J-PARCでははるかにそれを上回り、100倍から1000倍ぐらいの強度のミュオンが、正のミュオンでも負のミュオンでも得られます。ですから今後はJ-PARCでやります。また永嶺先生の「超低速の正のミュオン」も、我々の中心課題として、Uラインというところでやっています。また「負のミュオン」に関しても「ミュオン触媒核融合」についても、科研費の新学術領域研究を新しくとって進めようとしているところです。永嶺先生が最初に提案されてからずいぶん時間がかかってしまいましたが、着実に実現しつつあります。

高崎：Uラインですか。

三宅：はい。超低速正ミュオンの専用ミュオンビームライン、Uラインです。一方、超低速ミュオンビームを再加速することによりミュオンの異常磁気能率g-2を精密測定する研究は、Hラインで計画されています。

齊藤：J-PARCの中でもミュオン実験施設は立ち上がりがかかなり遅く、三宅さんはほんとうにご苦労されたと思います。今は、ビームラインもかなり整備されてきて、あとはHラインだけつくればいいという状況ですね。ここで正ミュオン透過顕微鏡や素粒子ミュオン実験が展開されます。

三宅：最後の4本目がHラインで、そこでg-2などの大型実験計画が予定されています。

齊藤：超低速ミュオンビームの生成プロセスには何重ものロスがあるので、最初にクーリングをしっかりやる必要があります。ただ、その効率を上げるためにも、何をするにしても、もとのビームが大強度であって初めてできるアイデアなのですね。ですから、永嶺先生がそんなに強度のなかった時代に発案されて実現されたのは驚くべ

きことです。あれがなかったら、現在のようなJ-PARCでの展開には至らなかったと思います。

山崎：齊藤さんが永嶺さんのやっていることに関心を持たれたのはいつごろですか？

齊藤：実は学生のころからです。京大に特別講演に来ていただいて、3日間連続で講義をして、夜は飲むという、そういう訓練を受けました。その中で、今の火山のラジオグラフィーの話も含めて、ミュオンのありとあらゆるテクニクについて、しかもそのプロジェクトについてお話いただきました。残念ながら超低速ミュオンの記憶はありませんが、とにかくミュオンという粒子を使ってできることの広がりについて、夢も含めて我々の世代にしっかりと植え込んでいただいたと思います。

山崎：昔から、我々はミュオンというのは、非常に大事な粒子だと思っていたんです。しかし、加速器のプライマリービームの強度は低いし、それからミュオンで高品質なものをつくろうとすると、ビームチャネルとかも非常に大変になる。永嶺さんはそれをゼロから出発して全部つくっていったわけだから、人材の養成も含めて、たいへんに生産的であったと思います。

かつては、ミュオン研究者はほんの一握りしかいなかったけど、いまやグループと言えるまで成長してきた。国際的な広がりが出てきたことも大きいですね。

齊藤：そうですね。

山崎：J-PARCの時代となり、ミュオンは宇宙線の中で最も重要な素粒子となってきました。かつては実験のアイデアはあってもなかなか実施できませんでした。しかし最近は、いろいろなアイデアを考える人が出てきて、おもしろい時代になっています。

ひろがるミュオン科学

三宅：日経サイエンスの2020年1月号のインタビュー記事で紹介していた



だいたいの、永嶺先生が最初に始められた超低速正ミュオンです。これはレーザー共鳴イオン化法で作り出すところが一番重要なポイントになります。いったん超低速化したミュオンを再加速して、それを電子顕微鏡の電子の代わりに 200 倍重いミュオンを用いて、顕微鏡を作る、透過型ミュオン顕微鏡計画です。

これまで物性の世界では、正のミュオンというのは、スピン偏極した原子スケールの方位磁石として注目されていました。つまり、ミュオンは、スピン偏極した粒子として使われてきました。しかし我々が今やろうとしているのは、超低速ミュオンを再加速することで、ミュオンを波として使おうという提案です。

電子顕微鏡でできなかった事を克服できます。例えば電子顕微鏡の場合、電子は制動放射で光になってしまうので $1\text{ }\mu\text{m}$ よりも厚いものは見えません。従って、生きたものを凍らせて、それをスライスして観察しています。しかしミュオンは質量が 200 倍重いので、制動放射が起こりにくい。永嶺先生のように山のレントゲン写真が撮れるのは、この理由からです。制動放射の機構は質量の 2 乗に反比例するのでミュオンだと起こりにくく、光に変わりにくいので山でも透過できるわけです。

それを顕微鏡の世界に持ち込めれば、そのまま波動性を持たせたミュオンで、生きたままの細胞を観察できます。さらに電荷を持つので、AB 効果（アハラノフ・ボーム効果）も使えて、神経ネットワークの 3 次元的な電磁場分布をはかることができますようになります。そういう提案をしています。

高崎：それはプラスのミュオンビーム？

三宅：それはプラスのミュオンビーム？

三宅：プラスです。別途、負のミュオンの顕微鏡も提案しています。正のミュオンの顕微鏡は科研費の基盤研究 (S) で進めているんですが、今度、新学術領域で負ミュオンの顕微鏡を提案して、予算をつけていただきました。負のミュオンというのはまさに 200 倍重い電子であり、特性エックス線が出ます。これも永嶺先生が発案されたものです。

三宅：その中で特に大事なのは、負のミュオンとラムザウアー・タウンゼント効果とミュオン触媒核融合を組み合わせることです。

高崎：何効果？

三宅：ラムザウアー・タウンゼント効果。水素の中に重水素 D の不純物が少しあると、負のミュオン (μ^-) は重い D にすぐつかまるんですが、散乱の断面積は数 eV でほぼゼロになります。だからこの μ^- D はいくらでも動き回ることになる。相互作用が全くなくなるんです。したがって分厚い試料を用意しておけば、ものすごく効率

よく負のミュオンを使うことができます。その μ^- D の動き回ったものに、表面にトリチウム（三重水素）T をつけておくと、D と T が核融合反応を起こして、結果として、後に 10keV 程度の負のミュオンができます。その出てきた負のミュオンを効率よく集めると、負のミュオンで走査顕微鏡が作れるのです。そういう提案をして準備しているところです。

高崎：僕はよく理解できていないけど、菅原寛孝さんも同じ希望を言っていましたね。

三宅：顕微鏡として使うために、顕微鏡の専門家と一緒にになって、いろいろな補正をして収束させて、負のミュオンのマイクロビームをつくらうとしています。

齊藤：これができると、ミュオンコライダーも見えてきますね。

三宅：正のミュオンビームラインのミュオン源として、レーザー共鳴イオン化法によって作り出す超低速正ミュオンを用い、負のミュオンビームラインのミュオン源としては、ラムザウアー・タウンゼント効果とミュオン触媒核融合の組み合わせを使うことによって、エミッタンスに優れた正負ミュオンビームが実現されます。対ミュオニウム ($\mu^+ \mu^-$ ：正ミュオンと負ミュオンから構成される原子) も作ることもできます。これも永嶺先生がかつて提案されたことです。

齊藤：ほんとのミュオニウムを作るのですね。

山崎：ずっと前から永嶺さんは、加速器の将来計画としてミュオンコライダーを提案されてきた。それに関する準備的な研究があることも、いろいろ聞かされてきました。次のリニアコライダーを北日本につくる話がかなり具体化しているようですね。

永嶺：正統的なリニアコライダーは電子・陽電子でやろうというのが主流だと思いますが、この前の研究会で菅原さんが、そこをミュオンでやったらどうかと提案された。彼は前から、それには負のミュオンビームがきちんとで

きるかどうかポイントだと言っています。

三宅：菅原先生からは数年来の宿題が出ています。それをずっと言われ続けています。

永嶺：リニアコライダーにしてもリング型の電子加速器にしても、能率がものすごく悪いらしいです。とにかく素粒子研究を最先端に持っていくにはミュオンコライダーしかない。まず高輝度の低速のプラスとマイナスのミュオン源をつくれ、というのが菅原さんの考えのようです。

高崎：それは自明なんですよ。重くないと、シンクロトロン放射で加速エネルギーが消耗してしまうから。だからミュオンだと圧倒的に有利なわけです。

永嶺：最後に言おうと思っていたのですが、ミュオンという素粒子は、今後のサイエンスの命運を握っていると思います。2つあって、1つは加速器の未来。素粒子の最先端に行くには、どうしてもまずは重い粒子を効率よく加速してぶつける必要がある。これはもう、どうしてもなく重要なテーマだと思います。しかし今のLHC（欧州で稼働する大型ハドロン衝突型加速器）より先の候補は何もない。あるのはミュオンコライダーしかない。それが1つ。

エネルギー問題への貢献

永嶺：もう一点は、エネルギー源としてのミュオンです。これはもっと重要だと僕は思っている。

高崎：えっ？ 何？

永嶺：エネルギー源、要するに原子力の将来です。再生エネルギーが声高に叫ばれていますが、ほんとに大丈夫なのかどうか非常に怪しい。最終的に絶対大丈夫、物理学的に大丈夫だという解は、加速器を使うしかないと僕は思っているんです。カルロ・ルビアなどの研究者が言っていることですが、熱中性子核分裂反応では、廃棄物は残るし、資源も問題になる。そこで高エネルギー中性子を使って、非常に効率

のいい核分裂にすれば、廃棄物の問題もないし、エネルギーがどんどん取り出せる。資源リサイクルの問題もない。この加速器駆動炉の話は、今はおとぎ話になっている。でも、これをおとぎ話にしちゃいけないと僕は主張します。なぜならほかに方法がないからです。

速中性子（熱エネルギーより高いエネルギーを持つ中性子）を MeV ぐらいでたくさん生むには、陽子を 1.5 GeV とか 2 GeV のところにピークを作るのが一番いい。その先でパイオン（ π ）が生まれ、ミュオン（ μ ）が生まれて損失が起こるのですが、そこにミュオン核融合が登場するのです。これにより、速中性子とともにエネルギーを再生産し、加速器の面倒も全部みて、なおかつ余剰のエネルギーを世界に配ることができる。こんな装置が世界の各都市に置かれる可能性がある。僕はそういう時代に必ずなると思います。原理的にきちんと言えるエネルギー問題の解決策を出せと聞かれたら、これしかないと思う。だから、素粒子科学の最先端とエネルギー問題の最先端の両方について、ミュオンがその未来を背負っているのだと思います。

山崎：永嶺さんは、何カ月か前だったか、それに関する論文を書いておられますよね。

永嶺：いや、短い会議レポートだけで、論文にはまだしておりません。

山崎：論文、大いに期待しています。

永嶺：加速器駆動炉の話は、その後どうなりましたか。

齊藤：ベルギー政府が予算をつけて、MYRRHA というプロジェクトが走り始めました。11 月上旬にブリュッセルでオープニングのセレモニーがありました。

永嶺：とにかくエネルギー資源はやがてなくなっていく。そういうことになったときに、誰がほんとに責任を取ってくれるのか。僕は、ミュオンじゃないかと思っています。

齊藤：ミュオンという素粒子から始めて、マクロスケールの話まで全て

をつないで話ができるのは、まさに永嶺先生の真骨頂だと思います。今のミュオン核融合の話 1 つ取り上げても、ミュオンの粒子がどういうふうに原子軌道にトラップされるかというプロセスを全部通ってきますよね。そこを全部つなげて考えられる人は、最近ではあまりいないのです。我々の世代になると、素粒子と原子核と原子物理という学問が大きく分離してしまっているんで、そこをつなげて考えられる人はなかなかいないと思います。

三宅：ミュオン触媒核融合 μ CF を使ってエネルギーをつくるという永嶺先生の理論の展開を、東北大の木野康志さんが新学術領域で進められています。加速したミュオン重水素原子 ($D\mu$) と三重水素 (T) でミュオン触媒核融合を起こすと、通常の DT 核融合より 4 桁も起こりやすくなります。それが実現すると、これまでと比べて効率よくエネルギーをつくることができるのが一点。もう一点は、放射性廃棄物とくに超寿命核分裂生成物 LLFP の処理技術です。京大の森義治先生が、ミュオン触媒核融合と FFAG（固定磁場強収束）を組み合わせ、 10^{18} の負のミュオンを作り、さらに 10^{19} から 10^{20} の中性子源をつくる技術の特許を取られています。この計画も含めて、永嶺先生のご提案は、時間はかかっていますが、一歩ずつですが、取り組まれ続けていると思います。

山崎：ミュオンを使ったラジオグラフィの応用で、福島第一原発の炉心の観測が行われ、新聞にも大きく取り上げられました。高崎さんはそれを先頭に立ってやっておられますね。

高崎：観測した原子炉の画像は公表しています。例えば 2 号炉の圧力容器の中には、燃料がまだ溶け落ちないで残っていることがミュオンの画像でわかります。福島原子炉は放射線が強くて近づきにくいけど、宇宙線ミュオンを使って調べると中が見えるんです。さらに、原子炉の中に半導体検出器を入れて、中の状態を詳しく見ようとしています。ただ、全体像を継続し

て観測してほしいという東京電力の要請もあります。我々がいつまでもやるわけにもいかないから、東電は自分たちでも始めそうです。

山崎：そうですね。有効な検知方法があるのに、使わないのはもったいないですからね。

未来の加速器は？

永嶺：ミュオンコライダーについても少し議論していただけないでしょうか。

高崎：菅原さんも言っていたけど、正と負のミュオンビームを正面衝突させるミュオンコライダーしか、未来の加速器はないのかなという気がします。ハドロンによるスーパー LHC の見通しは明るくない。

齊藤：要するにハドロンコライダーでは、ほんとうに素粒子反応として使えるエネルギーは、1/10 程度なんです。それは陽子の構成要素であるクォークやグルーオンたちが持ってきたエネルギーが、素粒子反応としてのエネルギーだからです。

一方、ミュオンの場合、電子の場合もそうですが、点粒子なのでそれ以上の構造を持ちませんから、エネルギーがそのまま全部つぎ込める。例えば

250GeV のリニアコライダーであれば、250GeV そのままだが素粒子反応に生きてくるわけです。ミュオンで 1TeV とか 10TeV という提案がなされていますが、そこまで行ければすばらしいことですよ。

高崎：次の素粒子加速器はリニアコライダーで、岩手県につくろうと一生懸命やっていますが、あれでも限界があると思うから、最終的にはミュオンでやらないと、高いエネルギーに行きにくいのではないかと、という気がします。永嶺：J-PARC できちんと正ミュオンビームと負ミュオンビームが生まれたら、世の中がらりと変わりますよ。

高崎：可能性はありますね。

齊藤：そうですね。素粒子物理も含めてです。

LHC だって既に山手線ぐらい大きいわけです。そういう大きい加速器を必要な精度でアライン（軸合わせ）していくテクニックを、人類はすでに開発したわけです。そして最後はそのビームをもっと高い精度で衝突させなければいけないわけです。そこにもいろいろな成果が積みまれています。加速勾配もどんどん上がっています。そういうテクニックを使っていけば、今後我々がやろうとするのは「ミュオンコライダー」かもしれない。

もともとファインマンが言ったことだと私の指導教官から伺ったのですが、何が限界で進歩が止まっているのか、きちんと明らかにしておくことが大事なんです。というのも、その限界というのが、ほかの理由で解かれることがあるからだと言うんですね。

高崎：ファインマンね、なるほど。

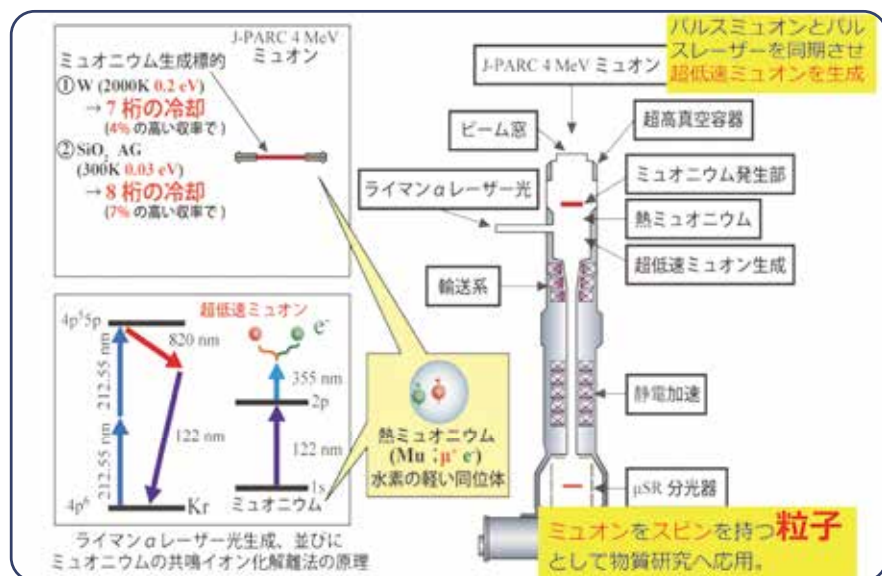
齊藤：何が限界なのか、突き詰めておけということです。それはなぜできないのか、というところなんです。そこをきちんと明らかにしておけば、何かの理由で解けることがある。

高崎： μ^- はまだですね。何ができないのですか？

齊藤：要するに、簡単にミュオン原子状態になり、物質にトラップされてしまうから、 μ^- のクーリングは難しいのです。クーリングが必要なのは、最終的に加速する位相空間に入れていくためです。位相空間がどうしても限られているため、そこにどうやって押し込めるかがポイントです。大強度のビームを背景に、初めて実現した手段を使って、実際研究を進めていく時代に入っていると強く感じます。

三宅：J-PARC では 3GeV の陽子を使っていることが大事なんです。pp か pn 反応で π^- をつくるのですが、3GeV は π^- をつくりやすいんです。それよりもエネルギーが大きくなると反陽子とか K 中間子のチャネルが開いてしまう。ちょうどいいエネルギーが 3GeV なんです。したがって、まさに負のミュオンをつくるために理想的な加速器が J-PARC のミュオン施設なのです。

齊藤：永嶺先生の加速技術に立脚して、世界で初めて高周波で加速する研究をやらせていただき、それを続けていくと、10GeV 程度のエネルギーのミュオンが、少なくとも μ^+ については目処がついています。それがトモグラフィにもかなり使えて、いろいろな試験もできるようになりました。その技術の延長線上に期待の μ^- ができれば、すぐに衝突型加速器の技術に結実させることができると思うんですが、



超低速正ミュオン生成の原理

やはり難題はクーリング技術なんですよ。

今後の展開

三宅：今一番力を入れているのは、文系の人を巻き込んで進めている文理融合です。考古学の人と一緒に、ミュオンを使った非破壊の元素分析をしようとしています。

高崎：注目されているので、学問のコミュニティを育てることも必要ですね。

三宅：古墳のラジオグラフィーも、文系の人々が代表になって一緒にやらせてもらおうとしています。そのうち永嶺先生のところにご相談に行きたいと思っています。

永嶺：ミュオン物性とかミュオン考古学とかいった分野も考えたら、ものすごくたくさんあると思う。それと原子物理学に関連する現象でおもしろいテーマがたくさんあると思います。

三宅：特に遷移端温度センサー TES は、理研の東俊行さんが新学術領域でやっています。負のミュオンは原子核の 200 倍近い位置にあるので、超強電場下での中での QED（量子電磁：荷電粒子と電磁場の相互作用を量子力学的に捉える量子論）を調べることができます。TES は分解能がいいので、ネオンミュオン原子の遷移に対し、ものすごく精度の良い実験結果が得られます。

山崎：ほかのトピックスは何かありますか。

永嶺：宇宙線を使ってものを見るのを始めたときから、やってみたいと思っていたのが富士山の中を見ることですね。富士山は、あれだけ大きな山なのに、途中まで川がないんですよ。だから中に必ずや水だまりがある。もしそこにマグマが上がってきたら、水蒸気大爆発が起こるはずですよ。したがって、とにかく水だまりを見つけておく必要がある。今、私が山梨大学の客員教授になってやっています。

高崎：鳥養映子さんがやっているもの

ですね。

永嶺：隣接する大学も共同して 1 万個ぐらいのカウンターを並べて、みんなで富士山を観測すれば、ダイナミクスが見えてくるわけです。爆発が起こるまでには準備したいです。

高崎：富士山について考えたけど、検出器をそんなにたくさん置く必要はないと、僕は思っているんですよ。

永嶺：でも、大体 10 km が限度です。それ以上は宇宙線でも使えない。

高崎：いやいや、それはよく考えたほうがいい。

齊藤：そうですね。スパースモデリングとか、新しいテクニックがかなり開発されています。あんまりたくさんのデータをとらなくても、大体想像のつく程度の構造であればわかります。

高崎：大事なものは、早くデータをとって、こういう絵が撮れましたと早く世の中に提示することでしょう。

山崎：今日はなかなかシリアスな座談会でした。僕は東大に中間子科学実験センターができたときの最初のスタッフで、そのころからずっと永嶺さんにつき合っていますけれども、永嶺さんが言っていることで大事なのは、夢と情熱なのです。一時はダメになっても、10 年か 20 年たっているうちに、すごく重要なテーマとなって復活することだってあるわけです。今後も頑張ってください。

今回は未解決の問題も多く、重要な問題提起もなされたと思います。個々のプロGRESSを聞きたいし、そのための適当なワークショップができればとも思いました。

高崎：それはいい。

齊藤：すばらしい提案です。

山崎：世の中で当たり前だと思われていることだけやっていても仕方ない。そんなことできないと思うことをやらなければいけないと思う。あそこへ行けばおもしろいことが聞けるぞとなれば、若い人たちがたくさん来るはずなので、何とか頑張ってやっていきたいと思っています。本日はどうもありがとうございました。

永嶺 謙忠（ながみね かねただ）

1941 年神奈川県生まれ。東京大学工学部応用物理学科卒。東京大学工学部助手、東京大学理学部助手・助教授・教授、理化学研究所ミュオン科学研究室主任研究員、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所教授、米国カリフォルニア大学リバーサイド校物理研究員、総合研究大学院大学教授、山梨大学客員教授を歴任。井上學術賞、東レ科学技術賞を受賞し、ミュオンラジオグラフィの開拓と大規模構造体の非破壊的研究により 2019 年日本学士院賞受賞。

高崎 史彦（たかさき ふみひこ）

1943 年栃木県生まれ。東京大学理学部物理学科卒。東京大学理学部助手、同理学部附属高エネルギー物理学実験施設助手、高エネルギー物理学研究所教授、同物理研究部研究主幹、同素粒子原子核研究所研究主幹等を歴任し、2006 年高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所長。現在、高エネルギー加速器研究機構名誉教授。仁科記念賞、折戸周治賞、米国物理学会パノフスキー賞を受賞し、2017 年、B 中間子系における CP 対称性の破れの研究により日本学士院賞受賞。

三宅 康博（みやけ やすひろ）

1956 年大阪府生まれ。東京大学工学部原子力工学科卒。ブリティッシュコロンビア大学ポストドク、日本原子力研究所高崎研究所研究員、東京大学理学部附属中間子科学研究施設助手、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所助教授、高エネルギー加速器研究機構 J-PARC 推進部教授、J-PARC 物質生命科学研究施設ミュオンセクション長等を歴任。現在、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所研究主幹・教授。

齊藤 直人（さいとう なおひと）

1964 年青森県生まれ。京都大学理学部卒。理化学研究所放射線研究室基礎科学特別研究員、同 研究員、同 副主任研究員。この間、理研 BNL 研究センター研究員を兼務。2002 年から、京都大学大学院理学研究科助教授、2006 年から高エネルギー加速器研究機構大強度陽子加速器計画推進部教授、同素粒子原子核研究所教授、同 J-PARC センター教授を歴任。また、2009 年より、東京大学大学院理学研究科併任教授を兼任。2015 年より J-PARC センター長。

山崎 敏光（やまざき としみつ）

1934 年東京都生まれ。東京大学理学部物理学科卒。同大原子核研究所助手、カリフォルニア大学ローレンス・バークレー研究所研究員、ニールス・ボーア研究所研究員、東大教授を経て、1986 年から東大原子線研究所所長。退官後は日本学術振興会監事などを歴任。東京大学名誉教授、日本学士院会員。原子核物理と素粒子ビーム科学における業績で、1987 年恩賜賞・日本学士院賞受賞。1994 年藤原賞、2009 年文化功労者、2010 年瑞宝重光章。

糖鎖の謎

東京都健康長寿医療センター研究所
シニアフェロー 遠藤 玉夫

私はこれまで PJA 誌に論文を投稿する機会を2度いただいた (PJA 80, 128-139, 2004; 95, 39-51, 2019)。この二つは続き物である。最初の論文は、筋肉の糖鎖を研究し全く新しいタイプの糖鎖を発見したこと、そしてこの糖鎖を作り出す酵素の性質を明らかにしたところ、難病である筋ジストロフィーの原因であること、を解説した。2 報目はその後の進展について解説した。内容はこれまで人体では報告がなかったリビトールリン酸を含む糖鎖を発見し、特に日本でも多い福山型先天性筋ジストロフィー (FCMD) は、リビトールリン酸がうまく糖鎖に組み込まれないことが原因であることを記述したものである。

これらの論文で議論した糖鎖について簡単に説明しよう。糖鎖は、文字通り単糖が鎖の様に繋がった分子である。単糖とはグルコースやマンノースなど 10 種類程度である。糖鎖は、核酸 (DNA、ヌクレオチドの鎖)、タンパク質 (アミノ酸の鎖) と並ぶ三大生体ポリマーであるが、それぞれ情報の伝え方は異なる。DNA は 4 種類の塩基配列によって遺伝情報を保持し、3 つずつの塩基の組み合わせによってそれぞれ該当するアミノ酸をコードする。タンパク質は 20 個のアミノ酸が順番に繋がったものである。こうして遺伝情報は鋳型に従いタンパク質へ情報が正確に翻訳される。ところが、糖鎖は DNA やタンパク質と異なり、鋳型なしに複数の酵素が順に働くことにより作られる。そのため、細胞環境により各酵素のバランスが少し変わるだけで糖鎖は大きく変化する。つまり、細胞環境の影響を最も敏感に捉え、表

出するのが糖鎖である。しかしながら、決して場当たりの良い加減に作られてはいない。その精緻なメカニズムは、まだ秘密のベールに包まれている。

糖鎖は細胞表面に存在し森のように細胞を覆っており、細胞と外界とのコミュニケーションに重要である。糖鎖により決定される識別の代表例を紹介する。それは ABO 式血液型である。図 1 に示すように、分子量 200 前後の単糖が末端に付くか付かないかで ABO 式血液型は決定される。血液型不適合による輸血事故はこの微妙な糖鎖構造の違いで起こる。血液型と寿命との話を紹介しよう。東京在住の百寿者 (100 歳以上生存された、いわゆる長寿の方) の ABO 式血液型の分布は、B 型が有意に多い傾向がみられ、B 型糖鎖が長寿に関連している可能性が示唆された。ある種のウイルスは ABO 式血液型によって感染性が異なることが知られているので、糖鎖の違いがウ

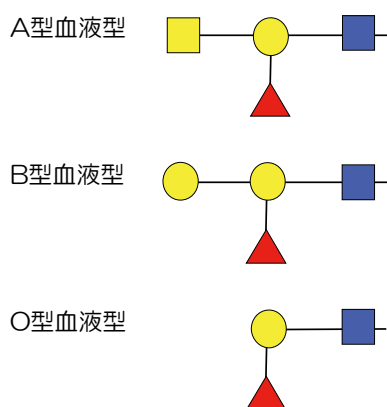


図 1

ABO 式血液型の糖鎖構造。なお、AB 型は A 型と B 型の両方の糖鎖をもつ。使用したシンボルは、それぞれの単糖を示す。■ N-アセチルガラクトサミン、● N-アセチルグルコサミン、● ガラクトース、▲ フコース

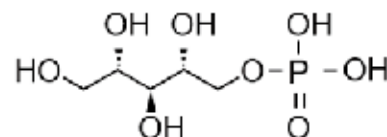


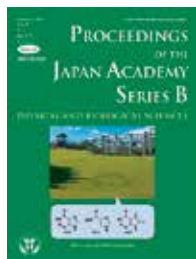
図 2 リビトールリン酸

イルスなどの感染し易さに影響を与え、血液型と長寿との関連が生じているのかもしれない。糖鎖と長寿の関係は、原因なのか結果なのか興味深い。

最後に FCMD とリビトールリン酸 (図 2) の関係について述べる。FCMD は 1960 年福山幸夫博士によって報告された。その約 40 年後、戸田達史博士は FCMD の原因遺伝子を同定した。遺伝子産物であるフクチンはアミノ酸配列の特徴から糖鎖に関連するタンパク質であろうと推定されたが、その機能の解明にはそれから 15 年を要した。我々は世界で最初にフクチンはリビトールリン酸を糖鎖に組み込む酵素であることを明らかにした。哺乳類におけるリビトールリン酸を含む糖鎖の初めての発見となった (正確にはリビトールは単糖ではなく糖アルコール)。リビトールリン酸はこれまでグラム陽性菌の細胞壁成分であるタイコ酸を構成することしか知られていなかった。リビトールリン酸を含む糖鎖の哺乳類での発見は、糖鎖の保存と機能という観点から興味深い。これを欠くと中枢障害を伴う最重症タイプの筋ジストロフィーを発症する、そのリビトールリン酸をずっと保存した意味はなんだろう? 現在リビトールリン酸を使用した FCMD の治療法の開発を目指している。

※遠藤氏は 2017 年、戸田達史氏との共同研究で日本学士院賞を受賞された。

No. 1



Reviews

- Keiji MARUOKA: Design of high-performance chiral phase-transfer catalysts with privileged structures 1
- Naoki YOSHIDA: Formation of the first generation of stars and blackholes in the Universe 17
- Hirokazu KAWAGISHI: Are fairy chemicals a new family of plant hormones? 29
- Tamao ENDO: Mammalian O-mannosyl glycans: Biochemistry and glycopathology 39

Cover Illustration

No. 2



Review

- Hirofumi YASUE, Yuji MIZUNO and Eisaku HARADA: Coronary artery spasm — Clinical features, pathogenesis and treatment — 53

Cover Illustration

Original Articles

- Maryam HASSANVAND, Yoshinori AKAISHI and Toshimitsu YAMAZAKI: Analysis of $\Lambda(1405)$ production data in the $\pi^- p \rightarrow K^0 \pi \Sigma$ reaction at $p_\pi = 1.69$ GeV/c 67
- Yuuta IMOTO, Yuichi ABE, Kanji OKUMOTO, Mio OHNUMA, Haruko KUROIWA, Tsuneyoshi KUROIWA and Yukio FUJIKI: Dynamics of the nucleoside diphosphate kinase protein DYNAMO2 correlates with the changes in the global GTP level during the cell cycle of *Cyanidioschyzon merolae* 75

Obituary

- Kunihiko SUZUKI: Dr. Tamio Yamakawa (1921–2018) 86

No. 3



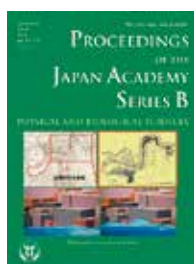
Reviews

- Kenso SOAI: Asymmetric autocatalysis. Chiral symmetry breaking and the origins of homochirality of organic molecules 89
- Yasushi OKAMURA and Yoshifumi OKOCHI: Molecular mechanisms of coupling to voltage sensors in voltage-evoked cellular signals 111

Cover Illustration

- Koichi FURUKAWA, Yuhsuke OHMI, Yuji KONDO, Robiul H. BHUIYAN, Orie TAJIMA, Pu ZHANG, Yuki OHKAWA and Keiko FURUKAWA: Elucidation of the enigma of glycosphingolipids in the regulation of inflammation and degeneration — Great progress over the last 70 years — 136

No. 4



Review

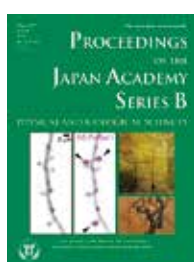
Nobuo SHUTO: Tsunami hazard mitigation 151

Cover Illustration

Original Article

Eizo NAKAMURA, Tak KUNIHIRO, Tsutomu OTA, Chie SAKAGUCHI, Ryoji TANAKA, Hiroshi KITAGAWA, Katsura KOBAYASHI, Masahiro YAMANAKA, Yuri SHIMAKI, Gray E. BEBOUT, Hitoshi MIURA, Tetsuo YAMAMOTO, Vladimir MALKOVETS, Victor GROKHOVSKY, Olga KOROLEVA and Konstantin LITASOV: Hypervelocity collision and water-rock interaction in space preserved in the Chelyabinsk ordinary chondrite 165

No. 5



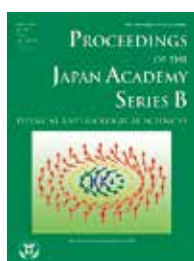
Reviews

Kisho OBI-NAGATA, Yusuke TEMMA and Akiko HAYASHI-TAKAGI: Synaptic functions and their disruption in schizophrenia: From clinical evidence to synaptic optogenetics in an animal model 179

Cover Illustration

Yuta MURAKAMI, Kiyoshi SAITO, Hiromi ITO and Yasuhiro HASHIMOTO: Transferrin isoforms in cerebrospinal fluid and their relation to neurological diseases 198

No. 6



Reviews

Takeshi HORIE: Global warming and rice production in Asia: Modeling, impact prediction and adaptation 211

Harumi TAKAHASHI, Norihide YOKOI and Susumu SEINO: Glutamate as intracellular and extracellular signals in pancreatic islet functions 246

Masamitsu FUTAI, Ge-Hong SUN-WADA, Yoh WADA, Naomi MATSUMOTO and Mayumi NAKANISHI-MATSUI: Vacuolar-type ATPase: A proton pump to lysosomal trafficking 261

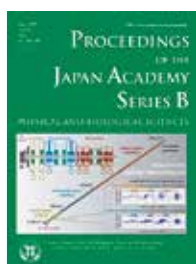
Naoto NAGAOSA: Emergent electromagnetism in condensed matter 278

Cover Illustration

Shoichi ISHIURA and Taiji YOSHIDA: Plant-based vaccines for Alzheimer's disease 290

Original Article

Taiji YOSHIDA, Yuichiro WATANABE and Shoichi ISHIURA: Production of the herb *Ruta chalepensis* L. expressing amyloid β -GFP fusion protein 295



Reviews

- Toshihiko HOSOYA: The basic repeating modules of the cerebral cortical circuit 303
- Michiko SHIRANE: Roles of protrudin at interorganelle membrane contact sites 312
- Jun AKIMITSU: Towards higher- T_c superconductors 321
- Ying-Jey GUH, Takako Katherine TAMAI, Takashi YOSHIMURA: The underlying mechanisms of vertebrate seasonal reproduction 343
- Michihiro IGARASHI: Molecular basis of the functions of the mammalian neuronal growth cone revealed using new methods 358
- Noritada MATSUO: Discovery and development of pyrethroid insecticides 378
- Shigetou NAMBA: Molecular and biological properties of phytoplasmas 401

Original Articles

- Masuo SUZUKI: Unified variational theory of reversible and irreversible dynamics — Discovery of dissipative Lagrangians weighted in time 419
- Hiroki OKUNO, Hiroyoshi SAKURAI, Yoshiharu MORI, Reiko FUJITA and Masatoshi KAWASHIMA: Proposal of a 1-ampere-class deuteron single-cell linac for nuclear transmutation 430

Cover Illustration



Reviews

- Yoshiyuki SAKAKI: A Japanese history of the Human Genome Project 441
- Takeshi TOKUDOME and Kenji KANGAWA: Physiological significance of ghrelin in the cardiovascular system 459
- Yuki SATO and Motoko YANAGITA: Functional heterogeneity of resident fibroblasts in the kidney 468
- Yuhei NISHIMURA, Kousuke KASAHARA and Masaki INAGAKI: Intermediate filaments and IF-associated proteins: from cell architecture to cell proliferation 479

Cover Illustration



Reviews

- Haruyuki OKUDA: A half century of infrared astronomy—A personal recollection of the footprints in Japan 495
- Takashi NISHIKAZE: Sialic acid derivatization for glycan analysis by mass spectrometry 523
- Kazuwa NAKAO: Translational science: Newly emerging science in biology and medicine —Lessons from translational research on the natriuretic peptide family and leptin— 538

Original Article

- Kaori FUJITA: Dynamic performance of bracket complexes used in traditional timber structures in Japan 568

Cover Illustration



Reviews

- Masato KASUGA: Structure and function of the insulin receptor — a personal perspective . . . 581
- Seiji SHINKAI: "Dynamic" molecular recognition and chirality segregation utilizing concepts of molecular machines and molecular assemblies . . . 590

Cover Illustration

- Akira SUGIYAMA, Takeshi KAWAMURA, Toshiya TANAKA, Hirofumi DOI, Takefumi YAMASHITA, Keiko SHINODA, Hideaki FUJITANI, Kenzo YAMATSUGU, Yohei SHIMIZU, Toshifumi TATSUMI, Kazuki TAKAHASHI, Motomu KANAI, Eiichi MIZOHATA, Tatsuya KAWATO, Takefumi DOI, Tsuyoshi INOUE and Tatsuhiko KODAMA: Cupid and Psyche system for the diagnosis and treatment of advanced cancer . . . 602

Original Article

- Kanae TERAMOTO, Tatsuki OKUBO, Yoshihiro YAMADA, Sadanori SEKIYA, Shinichi IWAMOTO and Koichi TANAKA: Classification of *Cutibacterium acnes* at phylotype level by MALDI-MS proteotyping . . . 612

Proceedings of the Japan Academy, Ser. B について

Proceedings of the Japan Academy, Ser. B は、文部科学省の機関である日本学士院が刊行する英文学術誌で、1912 年に創刊されました。本誌は、化学、物理学、天文学、地球・宇宙科学、生物学、工学、農学、医学等、Ser. A に掲載する数学を除く自然科学全分野を対象とします。年 10 回刊行し、総説論文 (Review) と、原著論文 (Original Paper、速報を含む) 等

を掲載します。冊子の他、インターネットでも J-STAGE (<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/pjab>) において全文が無料公開されます。もちろん、PubMed にも採録されています。

本誌への投稿資格に制限はありません。オンラインシステムによる投稿の他、電子メールや郵便による投稿も可能です。投稿された論文は、各分野の第一人者 2 名を査読者として厳正な査

読を行っており、アクセプトされた論文は、1 カ月程度で出版されます。また、投稿料・掲載料は不要で、別刷を無料で 50 部進呈します。カラーページは印刷 1 ページを無料としています。詳しい投稿規程は、本院のウェブサイト <https://www.japan-acad.go.jp/pjab> をご覧いただくか事務室まで御連絡ください。

Editorial Board

Editor-in-Chief

大塚正徳 (薬理学)

Executive Editors

鈴木邦彦 (神経化学・神経内科)

深尾良夫 (地球物理学)

Editorial Board Members

審良静男 (免疫学)

杉村 隆 (生化学・腫瘍学)

関谷剛男 (薬学・核酸有機化学)

田中耕一 (質量分析)

長田重一 (分子生物学・生化学)

安元 健 (水産化学)

山崎敏光 (物理学)



PJA Newsletter
[PJA ニュースレター]
No.12

発行/日本学士院
〒110-0007 東京都台東区上野公園7-32
TEL: 03-3822-2101 FAX: 03-3822-2105
e-mail: proc-b@mext.go.jp
発行日/令和2年3月29日

